Revista Internacional de
Ingeniería
de Estructuras

Vol.**22, 2** 163-189 (2017)

REVISIÓN DEL LÍMITE DE ESBELTEZ GLOBAL DEL MÉTODO SIMPLIFICADO DE ANÁLISIS SÍSMICO PARA ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA

REVIEW OF THE GLOBAL SLENDERNESS LIMIT FOR THE USE OF THE SIMPLIFIED METHOD OF SEISMIC ANALYSIS FOR MASONRY STRUCTURES

Arturo Tena Colunga
Profesor, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Edificio P4, 3er Piso, Av. San Pablo # 180, 02200 Ciudad de México.
Correo electrónico: atc@correo.azc.uam.mx.

Pablo Gandhi Pineda Máximo
Ingeniero Consultor
Cuajimalpa, 05410 Ciudad de México
Correo electrónico: pablofer@ymail.com.

RESUMEN

Por su versatilidad y simpleza, el método simplificado de análisis sísmico permitido desde hace varias décadas en los reglamentos modelo de diseño sísmico de México es frecuentemente empleado para el análisis, diseño o revisión de estructuras de baja altura (menores o iguales a 13 m) con base en muros de mampostería. Se han realizado estudios recientes encaminados tanto a mejorar las aproximaciones obtenidas con este método cuando se comparan con métodos más rigurosos, como para revisar sus límites de aplicación por concepto de excentricidades estáticas en planta y la flexibilidad de los sistemas de piso comúnmente utilizados en México para este tipo de edificios. En este trabajo se presentan los estudios encaminados a revisar otro aspecto importante y que es la limitante del método simplificado con respecto a la esbeltez global de la estructura. Para ello, se comparan los resultados de análisis obtenidos con el método simplificado con aquéllos obtenidos con métodos más rigurosos, como el método de la columna ancha equivalente y el método del elemento finito, para estructuras con base en muros de mampostería que cumplen con las demás restricciones del método. En términos generales, este estudio avala con resultados, y no con suposiciones, que el método simplificado pudiera incluso emplearse con confianza para edificaciones de hasta 18 metros de altura y con relaciones de esbeltez global límites cercanas a 2.25.

Palabras clave: método simplificado de diseño sísmico; estructuras de mampostería; relación de esbeltez

Recibido: Marzo de 2017
Aceptado: Abril de 2017

ABSTRACT

The simplified method for seismic analysis allowed by model seismic codes of Mexico is frequently used for the seismic analysis, design and review of lowrise shear wall masonry buildings (13 meters in height or less) because of its versatility and simplicity. Recently, some studies have been conducted to improve the approximations obtained with the simplified method with respect to more rigorous analytical methods. In addition, limits of application have been reviewed and proposed for static eccentricities in plan and for potential diaphragm flexibility for the most commonly used floor systems for these structures in Mexico. On the same trend, the studies devoted to review the global slenderness limits of the lowrise buildings in order to apply the simplified method of seismic analysis are presented in this paper. For this purpose, the results obtained with the simplified method for seismic analysis are compared to those obtained with the equivalent frame method and 3D finite element models for lowrise shear wall buildings that satisfy the requirements to use the simplified method of seismic analysis. In general, the study endorses with results and no with suppositions, that the simplified method for seismic analysis can be used with confidence for lowrise Masonry shear wall Structures up to 18 meters in height when the global building slenderness ratio is 2.25 or less.

Keywords: Simplified method for seismic design; masonry structures; global slenderness ratio.

1 INTRODUCCIÓN

En México, más del 70% de la construcción formal e informal incorpora muros de mampostería, ya sea como: a) el sistema estructural principal para resistir tanto cargas verticales como laterales, b) una línea de defensa adicional ante cargas laterales, como es el caso de los muros diafragma y, c) elementos no estructurales, como es el caso de los muros divisorios (coloquialmente llamados en México como “muros de relleno”), dado que son muy apreciados por los arquitectos y los usuarios de los inmuebles, puesto que proporcionan un adecuado aislamiento acústico que mejora las condiciones de confort de los usuarios de los inmuebles.

De hecho, una enorme mayoría de las construcciones para vivienda del país (casas habitación, edificios de departamentos) se construyen con base en muros de mampostería. Con excepción de las grandes metrópolis de México, donde existen edificios de vivienda de gran altura y con otros sistemas estructurales con base en marcos de concreto reforzado, de acero estructural o sección compuesta (perfiles de acero ahogado en concreto reforzado), la enorme mayoría de la vivienda del sector formal en el país se resuelve con estructuras de mampostería confinada de uno y dos niveles, en el caso de casas habitación, y de entre tres y cinco niveles, en el caso de edificios, aunque en las grandes ciudades existan edificios con base en mampostería confinada de seis niveles o incluso más.

Por esta razón, en zonas sísmicas el empleo del método simplificado de análisis sísmico permitido en los reglamentos o recomendaciones modelo de

diseño sísmico desde mediados de los años setenta es muy popular, pues su empleo es sencillo, se obtienen resultados de una manera muy rápida y se puede programar de manera muy simple, incluyendo herramientas tan comunes actualmente como las hojas de cálculo. Si sus bases y limitantes se entienden cabalmente, el método simplificado puede ser muy versátil, pues permite a los diseñadores analizar distintas alternativas de estructuración o variantes de una misma con muy poco esfuerzo y tiempo empleado.

El método simplificado de análisis sísmico de los reglamentos de diseño sísmico modelo de México ha sido revisado y actualizado razonablemente durante el presente milenio.

Los primeros estudios encaminados a proponer un límite para la excentricidad estática en planta para el empleo del método simplificado arrojaron resultados tan sorpresivos como interesantes. En ellos se encontró que en estructuras con base en muros, aún para distribuciones totalmente simétricas de muros en planta, y con la misma distribución de muros en todas las plantas, el eje de rotación en dirección vertical del edificio es oblicuo si se tienen muros de distintas relaciones de aspecto altura-largo (h/L), como consecuencia del distinto impacto de las deformaciones por cortante en los grados de libertad de rotación de los muros (Tena *et al*. 2002, Tena-Colunga y Pérez-Osornio 2005), y que éste eje sólo sería totalmente vertical si todos los muros tuvieran la misma relación de aspecto h/L. Esta particularidad ocasiona imprecisiones en la estimación de fuerzas cortantes con el método simplificado si se emplea el factor de área efectiva (F_{AE}) establecido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Mampostería de 1987 a 2004 (NTCM-87 1987, NTCM-95, 1995 NTCM-04 2004), las cuales pueden llegar a subestimaciones importantes para muros alargados (h/L<1).

Por ello, se decidió en primera instancia desarrollar un extenso estudio paramétrico (Cano 2004, Cano y Tena 2005, Tena-Colunga y Cano Licona 2010, Tena *et al.* 2010) donde se consideraron edificios de tres y cinco niveles con distribuciones totalmente simétricas de muros en planta, pero donde se variaron las relaciones de aspecto de los muros (h/L), resultando 430 modelos en función exclusivamente de las combinaciones de relaciones de aspecto de los muros. Como se consideraron tres distintos desempeños estructurales en función del nivel de agrietamiento considerado en los muros, se tuvieron 1,290 modelos distintos. A partir de los resultados obtenidos en estos estudios, se definieron factores de área efectiva más adecuados para los siguientes tres niveles de desempeño estructural: a) comportamiento elástico de todos los muros, b) agrietamiento de todos los muros de planta baja (edificios de tres niveles) y de todos los muros de los primeros dos pisos (edificios de cinco niveles) y, c) agrietamiento de todos los muros en todos los niveles.

Posteriormente, toda vez que ya se contaba con la propuesta concreta de Cano y Tena para nuevos factores de área efectiva para tres niveles de desempeño estructural, se realizó otro extenso estudio paramétrico en edificios de tres y cinco niveles con distribuciones asimétricas de muros en planta, donde se variaron tanto las relaciones de aspecto de los muros (h/L) como las excentricidades estáticas en planta (e_s), resultando 2520 modelos en total (Tena y López 2006, López 2007, Tena *et al.* 2010, Tena-Colunga y López Blancas 2011).

La finalidad de este estudio fue evaluar qué excentricidad estática en planta pudiera permitirse en función del factor de área efectiva empleado: el vigente en las NTCM-04 y los tres factores de área efectiva propuestos para los niveles de desempeño descritos anteriormente. Del estudio se encontró, entre otras cosas, que si se permite una subestimación máxima de la fuerza cortante de análisis entre el 30% y 40%, la máxima excentricidad estática calculada en planta (e_s) que debe permitirse para emplear el método simplificado debe ser igual a: a) 5% para el factor de área efectiva propuesto en las NTCM-04, b) 5% para el factor de área efectiva propuesto por Cano y Tena para un comportamiento totalmente elástico y, c) 10% para los factores de área efectiva propuestos por Cano y Tena para comportamiento parcialmente agrietado o totalmente agrietado.

Paralelamente, se realizó otro estudio donde se revisó la condición de rigidez de diafragma para tres sistemas de piso que se usan frecuentemente en estructuras de baja altura con base en muros de mampostería confinada: (1) losa maciza perimetralmente apoyada, (2) vigueta y bovedilla de concreto y, (3) losa plana aligerada con bloques de espuma de poliestireno de 40 cm x 40 cm (Cortés 2009, Tena y Cortés 2009). Para este propósito, se consideraron edificios de tres niveles totalmente simétricos que cumplen con todas las limitantes del método simplificado, donde se utilizaron tres diferentes relaciones de aspecto de la planta entre el lado mayor (L_1) y el lado menor (L_2): 1.0, 1.5 y 2.0, las cuales están dentro del límite considerado históricamente para el empleo del método simplificado ($L_1/L_2 \leq 2$). Para modelar la potencial flexibilidad del diafragma, se emplearon modelos tridimensionales en elementos finitos detallados, en los cuales se emplearon mallas razonablemente finas tanto para discretizar a los muros como a los sistemas de piso en estudio. Del estudio realizado se concluye que para el tipo de edificios estudiados y su geometría, la condición de rigidez "infinita" del diafragma se cumple razonablemente para los tres sistemas de piso en estudio, por lo que, para fines prácticos, se puede emplear con confianza el método simplificado para estructuras de estas características, ya que las subestimaciones máximas en las fuerzas cortantes que actúan en los muros se encuentran en intervalos de valores razonables, y por ende, tolerables. Sin embargo, se señaló en este estudio que la rigidez lateral de sistemas de piso con base en losas planas aligeradas con bloques de espuma de poliestireno o huecos depende fuertemente de las dimensiones de los huecos, puesto que la rigidez y resistencia en la zona donde se ubican los bloques o huecos depende exclusivamente del espesor de firme de compresión de este sistema de piso. En un estudio posterior se confirmó lo anterior, los sistemas de piso con base en losa plana aligerada (hueca o con material aligerante) dejan de ser rígidos a medida que aumenta las dimensiones de los huecos y los claros que salvan estos sistemas, llegando a comportarse como diafragmas semi-rígidos o incluso, semi-flexibles (Chinchilla 2012, Tena *et al.* 2013, Tena-Colunga *et al.* 2015).

Con base en los resultados de los estudios paramétricos a que se ha hecho referencia, además de corroborar la validez del límite propuesto en el método simplificado para la relación de aspecto de la planta ($L_1/L_2 \leq 2$) para los principales sistemas de piso utilizados en vivienda con base en muros de mampostería, a partir de 2008 se han incorporado en el método simplificado de diseño sísmico del Manual de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad (MOC-2008 2009, MOC-2015 2015) los factores de área efectiva propuestos por Cano y Tena. Los factores de área efectiva para una condición de comportamiento

totalmente elástico se recomiendan para la revisión de estado límite de servicio, y los factores de área efectiva para comportamiento parcialmente agrietado se emplean para el diseño para el estado límite de prevención de colapso. Además, se establece que para este último estado límite, el valor de la excentricidad estática se limita al 10% de la dimensión en planta en el sentido en que se mide la excentricidad, dado que para la gran mayoría de este tipo de estructuras, éste último estado límite normalmente regirá el diseño por sismo.

Además, para estructuras con aislamiento sísmico, donde se establece que el comportamiento de la estructura por encima del sistema de aislamiento debe ser esencialmente elástica, la propuesta del Manual de Obras Civiles (Tena 2016 y 2017) establece que sólo deben utilizarse los factores de área efectiva para comportamiento elástico y limita el valor de la excentricidad estática al 5% de la dimensión en planta en el sentido de que se mide la excentricidad.

Continuando con el esfuerzo que este equipo de investigación ha realizado para revisar y actualizar al método simplificado de análisis, en este trabajo se presentan los estudios encaminados a revisar otro aspecto importante y que es las limitaciones del método simplificado con respecto a la esbeltez global de la estructura. Para ello, se comparan los resultados de análisis obtenidos con el método simplificado con aquéllos obtenidos con métodos más rigurosos, como el método de la columna ancha equivalente y el método del elemento finito, para estructuras con base en muros de mampostería que cumplen con las demás restricciones del método, como se explica y presenta en las siguientes secciones, y se presenta con detalle en Pineda (2015).

2 MÉTODO SIMPLIFICADO DE ANÁLISIS SÍSMICO

2.1 Fundamentos

El método simplificado se basa en la distribución de fuerzas laterales de estructuras simétricas con diafragmas rígidos cuando la carga lateral se aplica en una sola dirección, como se ilustra en la Fig. 1.

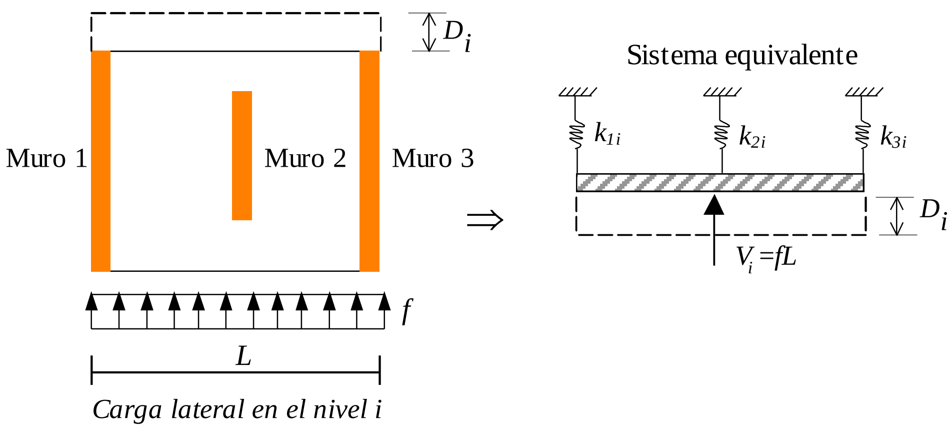


Figura 1 Distribución de fuerzas laterales en planta según el método simplificado

Bajo estas hipótesis, en un entrepiso iésimo (*i*) cualquiera, el cortante aplicado en el entrepiso V_i produce un desplazamiento uniforme D_i el cual es impuesto a los muros resistentes en la dirección de análisis, por lo cual cada muro *j* del nivel iésimo toma una fuerza cortante V_{ji} proporcionalmente a su rigidez lateral k_{ji}. Entonces, el cortante aplicado en cada entrepiso se distribuye entre los distintos muros o elementos resistentes proporcionalmente a su rigidez.

$$V_i = \sum_{j=1}^{n} V_{ji} = \sum_{j=1}^{n} k_{ji} D_i ; \quad \to D_i = \frac{V_i}{\sum_{j=1}^{n} k_{ji}} \tag{1}$$

$$V_{ji} = k_{ji} D_i = \frac{k_{ji}}{\sum_{j=1}^{n} k_{ji}} V_i \tag{2}$$

La rigidez lateral de un muro depende principalmente de su deformación por cortante. Por lo tanto, si las deformaciones por flexión se toman de manera indirecta a partir de la rigidez a cortante en términos de un factor de área efectiva (el cual puede ser entendido por algunos como un factor de ajuste), entonces la rigidez lateral k_{ji} del muro *j* del nivel iésimo se puede aproximar como el producto de su módulo de rigidez a cortante *G* por su área efectiva a cortante dividida entre la altura de entrepiso H_i:

$$k_{ji} = \frac{G F_{AE_{ji}} A_{T_{ji}}}{H_i} \tag{3}$$

donde $F_{AE\,ji}$ es el factor de área efectiva del muro *j* del nivel iésimo propuesto por el método simplificado y $A_{T\,ji}$ es el área de su sección transversal. Por lo tanto, de las ecuaciones 2 y 3 se obtiene que la fuerza cortante que debe tomar el muro *j* del nivel iésimo es:

$$V_{ji} = V_i \frac{F_{AE_{ji}} A_{T_{ji}}}{\sum_{j=1}^{n} F_{AE_{ji}} A_{T_{ji}}} \tag{4}$$

Dado que la rigidez lateral de los muros depende principalmente de su rigidez a cortante, la rigidez lateral de los muros en elevación se puede discretizar mediante un modelo de cortante (Fig. 2), por lo que se pueden despreciar las rotaciones que experimentan los muros en los entrepisos. En virtud de lo anterior, la matriz de rigidez lateral $[K_D]_j$ del muro *j* es tridiagonal y, para el caso ilustrado en la Fig. 2, estaría dada por:

$$[K_D]_j = \begin{bmatrix} k_{jk}+k_{jl} & -k_{jl} & 0 \\ -k_{jl} & k_{jl}+k_{jm} & -k_{jm} \\ 0 & -k_{jm} & k_{jm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

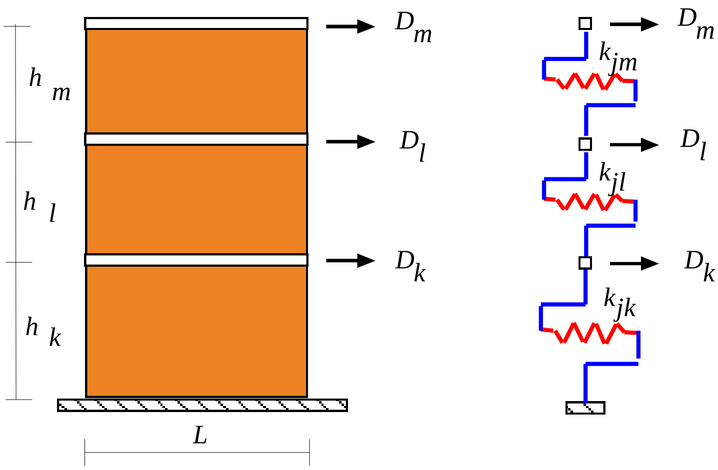


Figura 2 Modelado de los muros en elevación bajo las hipótesis del método simplificado

El factor de área efectiva F_{AE} propuesto para el método simplificado en el reglamento de diseño sísmico del Distrito Federal aún vigente (NTCS-04 2004, NTCM-04 2004) depende de la relación de aspecto del muro (alto entre largo, *h/L*) y está dado por las siguientes expresiones:

$$F_{AE} = 1 \qquad \text{si} \quad \frac{h}{L} \le 1.33 \quad (6)$$

$$F_{AE} = \left(1.33\,\frac{L}{h}\right)^2 \qquad \text{si} \quad \frac{h}{L} > 1.33 \quad (7)$$

En el Manual de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad (MOC-2008 2009, MOC-2015 2015) se establecen los siguientes factores de área efectiva a partir de la versión de 2008. Para comportamiento elástico:

$$F_{AE} = \begin{cases} 1.5 + \dfrac{h}{L} - 1.5\left(\dfrac{h}{L}\right)^2 & si \quad \dfrac{h}{L} \le 1 \\ 2.2 - 1.5\dfrac{h}{L} + 0.3\left(\dfrac{h}{L}\right)^2 & si \quad 1 \le \dfrac{h}{L} \le 2.5 \end{cases} \quad (8)$$

y para el estado límite de prevención de colapso:

$$F_{AE} = 0.6 + 0.6\frac{h}{L} - 0.3\left(\frac{h}{L}\right)^2 + 0.05\left(\frac{h}{L}\right)^3 \qquad \text{si} \quad \frac{h}{L} \leq 2.5 \qquad (9)$$

2.2 Limitantes para su empleo

Para poder emplear el método simplificado de análisis y diseño de estructuras de mampostería, se deben cumplir las siguientes condiciones (NTCM-04 2004, MOC-2008 2009, MOC-2015 2015):

1. En cada planta, al menos el 75% de las cargas verticales estarán soportadas por muros ligados entre sí mediante losas monolíticas u otros sistemas de piso suficientemente resistentes y rígidos al corte. Dichos muros tendrán distribución sensiblemente simétrica con respecto a dos ejes ortogonales y deberán satisfacer las condiciones que establecen las correspondientes normas técnicas complementarias vigentes. Para que la distribución de elementos resistentes pueda considerarse sensiblemente simétrica, la excentricidad torsional en dos direcciones ortogonales, calculada estáticamente, no deberá exceder el 10% de la dimensión en planta del edificio, medida paralelamente a la excentricidad.
2. La relación entre longitud y ancho de la planta de la estructura no excederá de 2.0, a menos que, para fines de análisis sísmico, dicha planta se pueda suponer dividida en tramos independientes cuya relación entre longitud y ancho satisfaga esta restricción y la indicada en el inciso 1 y cada tramo resista la fuerza cortante que le corresponda calculada como se indica al final de esta sección.
3. La relación entre la altura y la dimensión mínima de la base de la estructura no excederá de 1.5 y la altura de la estructura no será mayor de $13\,\text{m}$.

En la aplicación del método simplificado se desprecia el cálculo de los desplazamientos horizontales, momentos torsionantes y momentos de volteo. Únicamente es necesario verificar que en cada piso la suma de las resistencias al corte de los muros de carga, proyectadas en la dirección en que se considera la aceleración, sea cuando menos igual a la fuerza cortante total que obre en el piso, calculada según se especifica en los reglamentos de referencia empleando los coeficientes sísmicos ahí establecidos que ya están reducidos por ductilidad, redundancia y sobrerresistencia.

Por supuesto, como todo procedimiento de análisis (simplificado o riguroso), el método simplificado tiene limitantes en su aplicación, por lo que su correcto empleo depende principalmente de la preparación, entendimiento y sobre todo, ética del usuario. Por ello, carece de sentido que algunos miembros del Comité de las Normas de Mampostería de la Ciudad de México hayan promovido su desaparición para la próxima versión de este cuerpo normativo, alegando exclusivamente su mal uso y entendimiento por parte de algunos usuarios. Ese problema se resuelve con una educación formal en análisis y diseño de

estructuras de mampostería a nivel licenciatura en ingeniería civil, y cursos de actualización profesional.

De hecho, ¿existe alguna garantía que la gran mayoría de los usuarios del método simplificado ahora aprendan a analizar y diseñar correctamente estructuras de mampostería con otras herramientas de análisis que requieren de mayor experiencia y sobre todo conocimiento, como es el uso del método del elemento finito? El primer autor tiene conocimiento de causa que aún algunos miembros del Comité de Mampostería tienen la errónea idea que ¡ser usuarios de programas de elementos finitos los hace automáticamente expertos en elementos finitos! ¡No!, para ello se debe además conocer a profundidad la teoría detrás del método del elemento finito. Existen muchos malos usuarios de programas de elementos finitos, así como existen muchos malos usuarios del método simplificado. De hecho, existen mucho más malos usuarios del método del elemento finito (tanto en cantidad como en porcentaje).

Por ello, el riesgo de obtener malos diseños en estructuras de mampostería no se arregla prohibiendo el uso del método simplificado y promoviendo el uso exclusivo de otros métodos más rigurosos. En opinión del primer autor, prohibir el uso del método simplificado para el diseño de estructuras de mampostería de baja altura puede ser contraproducente para la seguridad de un enorme inventario de estructuras de ese tipo, las cuales no son diseñadas actualmente ni se diseñarán (por cuestiones de presupuesto) en despachos establecidos de diseño estructural. De hecho, es por esa razón que ingenieros e investigadores de primer mundo, con patrocinios de la Organización de las Naciones Unidas, están buscando métodos simplificados de análisis y diseño de estructuras de mampostería confinada para plantas irregulares, para su empleo en países asiáticos en desarrollo, como la India (Post 2015, Porst *et al.* 2017). De hecho, los desarrollos que proponen se basan en el método simplificado de los reglamentos de México aquí resumidos, aunque con una propuesta poco conservadora con respecto a cuánta torsión debe permitirse (no existen restricciones en su propuesta), en parte por no tener conocimiento de los estudios realizados previamente para estudiar los límites de la excentricidad estática en planta (Brzev 2017), ya descritos anteriormente (por ejemplo, Tena *et al.* 2010, Tena-Colunga y López-Blancas 2011).

3 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS EN ESTUDIO

Con la finalidad de evaluar el límite vigente en el método simplificado para la relación global de esbeltez de la estructura, es decir, que la relación entre la altura (H) y la dimensión mínima de la base de la estructura (B=L_2) no exceda de 1.5 ($H/B \leq 1.5$), se estudiaron tres plantas tipo (modelos α, β y γ) correspondientes a un proyecto de hospital integral, como se explica con detalle en Pineda (2015). Todos los modelos se ubicaron en la zona III de las NTCS-04 (2004) y pertenecen al Grupo A. Las tres plantas tipo son rectangulares y simétricas, de 15.8 m de largo por 8 m de ancho, de tal forma que la relación largo-ancho en planta es L_1/B=1.98<2.0, por lo que cumplen con el límite vigente del método simplificado en cuanto a la relación de aspecto en planta. De estas tres plantas, con fines ilustrativos y en aras de salvar espacio, en este artículo se presentan exclusivamente los resultados obtenidos para los edificios para dormitorios

(modelos α), dado que los resultados obtenidos para las otras plantas que corresponden a oficinas o consultorios (modelos β y γ), fueron muy similares y, además, este modelo es el más crítico por contar con la menor densidad de muros en ambas direcciones (Pineda 2015).

La planta tipo de los modelos α se presenta en la Fig. 3. Los modelos α están estructurados con base en muros estructurales de mampostería confinada de tabique rojo recocido de 12.5 cm de espesor con resistencia de diseño a compresión de las piezas f^*_p=80 kg/cm^2, pegados con mortero tipo I según las NTCM-04 (2004). La densidad de muros (área neta de muros entre área de la planta del edificio) es de 5.8% en la dirección longitudinal o X y de 5.86% en la dirección transversal o Y. El sistema de piso es con base en losas de concreto reforzado perimetralmente apoyadas de 12 cm de espesor. Como se aprecia en la Fig. 3, la distribución de muros es completamente simétrica con respecto a dos ejes ortogonales en planta. Dicha distribución se propuso en función de los espacios necesarios para los dormitorios. Sin embargo, las dimensiones de dichos espacios también se ajustaron a los muros de manera que se tuvieran una variedad de esbelteces de los muros necesarias para este estudio, tal es el caso por ejemplo, de los baños, vanos y pasillos de los dormitorios. La planta baja del modelo se repite en las plantas superiores, en función del número de niveles en estudio. Se indican en la planta los muros de mampostería con línea gruesa continua y se identifican los distintos muros tipo con un número (1, 2, 3, …, 27), así como el área tributaria que cargan, con línea fina de puntos.

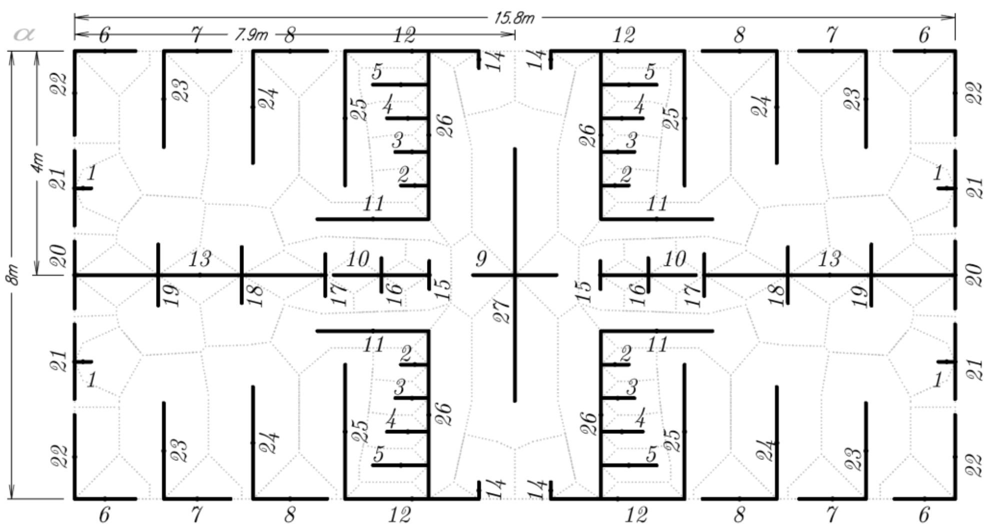
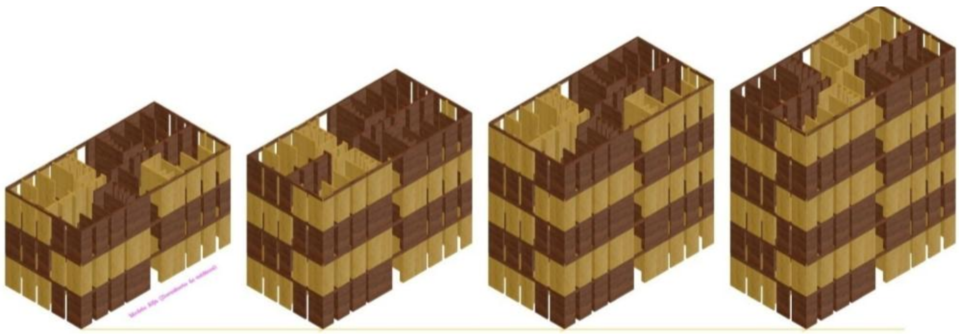


Figura 3 Planta tipo de los modelos α en estudio

Para estudiar la esbeltez global, se consideraron edificios de 3, 4, 5 y 6 niveles, con una altura de entrepiso típica de 3 metros, por lo que las alturas totales correspondientes (H) fueron de 9, 12, 15 y 18 m respectivamente, y tomando en cuenta que el ancho en planta es B=8 m (Fig. 3), las relaciones globales de esbeltez (H/B) obtenidas fueron de 1.13, 1.50, 1.88 y 2.25, para los modelos de 3, 4, 5 y 6 niveles respectivamente. Cabe señalar que, conforme a lo actualmente establecido en el método simplificado, sólo los modelos de 3 y 4

niveles cumplirían con las restricciones de altura máxima (*H*≤ 13m) y de relación global de esbeltez (*H/B*≤1.50). Sin embargo, los modelos de 5 y 6 niveles se estudiaron para explorar si esta limitante actual es demasiado restrictiva sin necesidad de ello, o si por el contrario, es totalmente adecuada, dado que se conoce que esta relación límite se estableció desde 1987 con base en la intuición y experiencia, pero no con base en estudios específicos que la justifiquen completamente. Cabe señalar, sin embargo, que las relaciones de esbeltez consideradas se encuentran dentro del intervalo permitido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo vigentes en la Ciudad de México (NTCS-04 2004) para estructuras regulares, que es de 2.5 (*H/B*≤2.50). En la Fig. 4 se presentan los isométricos de los modelos α, que se identifican empleando el número de niveles con que disponen como α3, α4, α5 y α6 respectivamente.



a) α3 b) α4 c) α5 d) α6

Figura 4 Isométricos de los modelos α en estudio

Como se aprecia de la Fig. 3 y en la Tabla 1, los modelos α disponen de muros con distintas esbelteces locales (*h/L*), las cuáles varían desde 0.5 (muros muy anchos), hasta 10, que realmente se tratan de mochetas y son prácticamente columnas y, normalmente éstas siempre se desprecian en los cálculos de las resistencias de los muros. Con esto se busca tener una amplia variedad de esbeltez local en los muros, y de esta forma poder observar el comportamiento del cortante último en una muestra relativamente amplia.

Tabla 1 Tipificación y relaciones de esbeltez de los muros de los modelos α

Dirección X				**Dirección Y**			
Muro tipo	**Total**	**L (m)**	**h/L**	**Muro tipo**	**Total**	**L (m)**	**h/L**
1	4	0.30	10	14	4	0.30	10
2	4	0.50	6	15	2	0.50	6
3	4	0.60	5	16	2	0.60	5
4	4	0.75	4	17	2	0.75	4
5	4	1.00	3	18	2	1.00	3
6	4	1.09	2.75	19	2	1.09	2.75
7	4	1.20	2.50	20	2	1.20	2.50
8	4	1.33	2.25	21	4	1.33	2.25
9	1	1.50	2	22	4	1.50	2
10	2	1.71	1.75	23	4	1.71	1.75
11	4	2.00	1.50	24	4	2.00	1.50
12	4	2.40	1.25	25	4	2.40	1.25
13	2	4.50	0.67	26	4	3.00	1
				27	1	4.50	0.67
Σ	45	58.62		Σ	41	63.77	

4 MÉTODOS DE ANÁLISIS EMPLEADOS

Para llevar a cabo este estudio, se realizaron análisis elásticos estáticos de combinaciones de cargas gravitacionales y laterales por sismo. Se emplearon tres métodos: a) el método simplificado (dos variantes), b) el método de la columna ancha equivalente y, c) el método del elemento finito. Se consideró que carga lateral por sismo tiene una distribución triangular invertida conforme se establece en las NTCS-04 (2004). Se consideró un coeficiente sísmico reducido efectivo de diseño c/*Q´*=*V*/*W*=0.285 según se obtiene a partir de la Tabla 7.1 de las NTCS-04 para una estructura de mampostería de piezas macizas de nueve metros de altura o más y perteneciente al grupo A. En la Tabla 2 se resumen las cargas totales de entrepiso consideradas tanto para el análisis por cargas laterales por sismo como por cargas gravitacionales. Los detalles de la estimación y distribución de cargas se reportan en Pineda (2015).

Tabla 2 Fuerzas gravitacionales y laterales empleadas en los análisis de los modelos α

Nivel	Modelo α3		Modelo α4		Modelo α5		Modelo α6	
	W (t)	F(t)	W(t)	F(t)	W(t)	F(t)	W(t)	F(t)
6							121.74	61.61
5					121.74	60.18	168.36	71.00
4			121.74	58.11	168.36	66.58	168.36	56.80
3	121.74	54.83	168.36	60.27	168.36	49.94	168.36	42.60
2	168.36	50.55	168.36	40.18	168.36	33.29	168.36	28.40
1	168.36	25.28	168.36	20.09	168.36	16.65	168.36	14.20
Σ	458.47	130.66	626.83	178.65	795.19	226.63	963.56	274.61

4.1 Método simplificado

Dado que los edificios en estudio se estructuraron al 100% con base en muros, la estimación de las cargas gravitacionales actuantes en los muros se realizó con base en las áreas tributarias indicadas con líneas punteadas en la Fig. 1. Esta distribución se estimó con base en la distribución de los muros en planta y la intuición del diseñador, dado que se consideró que la losa maciza se desplanta directamente sobre los muros, sin vigas secundarias que permitan definir tableros. Se revisó que todos los muros soportaran las cargas verticales de diseño conforme al método simplificado, como se detalla en Pineda (2015). En este estudio se rescatan las cargas gravitacionales de los muros en planta baja, para su posterior comparación con las obtenidas con los otros métodos de análisis.

La determinación de las fuerzas cortantes actuantes en cada muro se hizo conforme a la ecuación 4, considerando dos propuestas distintas para los factores de área efectiva, F_{AE}: a) los factores de área efectiva establecidos en las NTCM-04 (ecuaciones 6 y 7) y, b) un nuevo factor de área efectiva actualizado para comportamiento totalmente elástico, dado por la siguiente expresión:

$$F_{AE} = \frac{1}{0.85 + 0.15\left(\frac{h}{L}\right)^2} \tag{10}$$

La justificación y fundamento de este nuevo factor de área efectiva es el siguiente. Como se ha comentado, los factores de área efectiva propuestos previamente (Cano 2004, Cano y Tena 2005, Tena *et al.* 2010, Tena-Colunga y Cano-Licona 2010) se hicieron con base en extensos estudios paramétricos que consideraron relaciones de esbeltez de los muros en el intervalo $0.4 \leq h/L \leq 2.5$, por ser las relaciones más comunes en muros y, por ello, se indicaron claramente esos mismos límites en su aplicación, pues se estaba consciente que se estaban proponiendo polinomios de tipo parabólico. Dado que si se aplican estas ecuaciones fuera de esos límites la curva resultante crece en lugar de disminuir, el primer autor decidió retomar las bases teóricas de cómo debe derivarse el factor de área efectiva.

Así, a partir de la condensación estática de la matriz de rigidez global de muros idealizados como una columna ancha equivalente (Cano 2004, Cano y Tena 2005, Tena *et al.* 2010, Tena-Colunga y Cano-Licona 2010), se obtiene que los coeficientes de rigidez $k_{ij\Delta}$ de la matriz de rigidez lateral resultante del muro tiene la forma:

$$\left[k_{ij\Delta}\right] = \frac{aEt}{1+3\dfrac{L^2}{h^2}}\left[1-\frac{b+c\dfrac{L^2}{h^2}}{d+e\dfrac{L^2}{h^2}+f\dfrac{L^4}{h^4}}\right] \tag{11}$$

donde *E, t, L* y *h* son respectivamente el módulo de elasticidad, el espesor, la longitud y la altura del muro y *a, b, c, d, e* y *f* son coeficientes numéricos que dependen de la condensación estática de la matriz de rigidez global. Comparando las ecuaciones 3 y 11, se aprecia entonces en la ecuación 11 que el factor de área efectiva involucra una división polinomial compleja, donde en el numerador existen polinomios de segundo orden y en el denominador de cuarto orden en función de la relación h/L. Así, la función más simple que se puede proponer es una regresión hiperbólica. que resulta apropiada para representar el decremento asintótico del factor de área efectiva a medida que la relación h/L crece, como se establece en la ecuación 10.

De hecho, la ecuación 10 se obtuvo retomando la base de datos generada por Cano (2005), pero realizando una doble normalización de los datos obtenidos, de manera que cuando el cociente entre el cortante tridimensional (V_{3D}) y el del método simplificado sin considerar factor de área efectiva (V_{MS}) fuera 1.0 (V_{3D}/V_{MS}=1.0) siempre coincidieran en h/L=1.0. Así, las relaciones de esbeltez de los muros extremos (h_{ext}/L_{ext}) se normalizaron con respecto a la relación de esbeltez de los muros centrales de referencia (h_{cen}/L_{cen}), de manera que las relaciones de esbeltez normalizadas (h_{nor}/L_{nor}) se obtuvieron de la siguiente manera:

$$\frac{h_{nor}}{L_{nor}} = \frac{h_{ext}/L_{ext}}{h_{cen}/L_{cen}} \tag{12}$$

Dado que Cano (2005) consideró las siguientes relaciones de esbeltez de los muros centrales: 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5, esto permitió ampliar el intervalo original 0.4 $\leq h/L \leq 2.5$ a 0.2 $\leq h_{nor}/L_{nor} \leq 5.0$. Así, en la Fig. 5 se grafican los valores de los cocientes V_{3D}/V_{MS} obtenidos por Cano (2005) para sus modelos de 5 niveles con respecto a h_{nor}/L_{nor}, la regresión hiperbólica estadística de estos datos ("Regresión"), y el ajuste de los coeficientes de regresión de esta curva hiperbólica a valores prácticos definen al factor de área efectiva dado por la ecuación 10 (F_{AE} propuesto), dado que como se detalla y demuestra en los documentos ya citados, para fines prácticos se puede considerar que $F_{AE} \approx V_{3D}/V_{MS}$. Como se observa en la Fig. 5, en el ajuste hecho de la propuesta de este nuevo F_{AE} se privilegió cubrir los valores para relaciones $h/L>2.5$, a reserva de conducir un nuevo estudio paramétrico que permita refinar aún más esta propuesta.

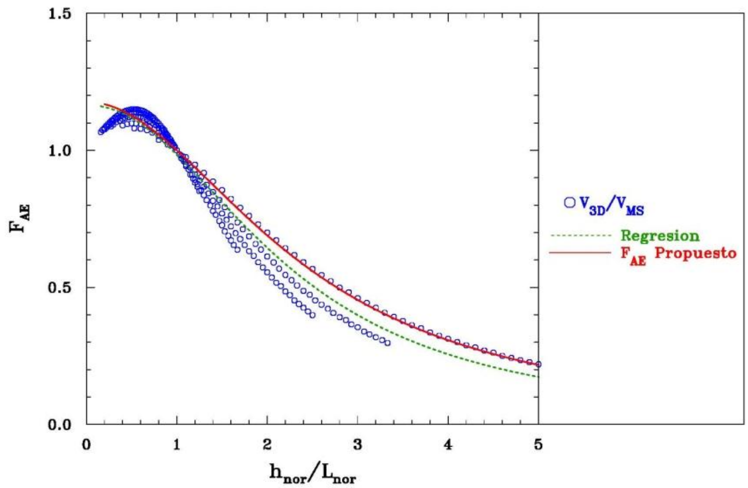


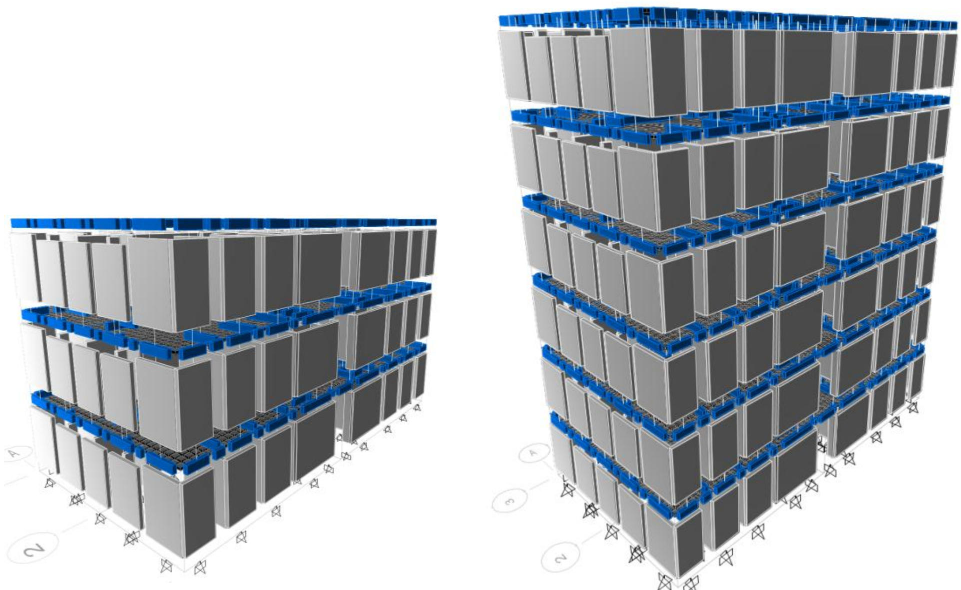
Figura 5 Propuesta de un nuevo factor de área efectiva F_{AE} para comportamiento elástico

4.2 Método de la columna ancha equivalente

En México se conoce como el "método de la columna ancha equivalente" al método del marco equivalente originalmente propuesto por Schwaighofer y Microys (1969) que también se describe con detalle en Bazán y Meli (1998), Tena (2007) y Tena *et al.* (2011). Este método es también muy empleado por los ingenieros de la práctica de México para el análisis y diseño de estructuras de mampostería confinada. De hecho, es el método más empleado para el diseño de estructuras de mampostería confinada donde no puede emplearse el método simplificado.

Para representar más fielmente la práctica de diseño de México, se utilizó el método de la columna ancha equivalente con apoyo de un programa comercial de análisis estructural, en este caso el ETABS (CSI 2013). Cada muro se modeló como una sola columna ancha, considerando que el módulo de elasticidad de la mampostería es E_m=21,600 kg/cm^2 y su módulo de rigidez a cortante G_m=9,000 kg/cm^2. Los muros en planta baja se consideraron empotrados en su plano principal de flexión y simplemente apoyados fuera del plano. La losa maciza de concreto reforzado se modeló con elementos tipo cascarón grueso (25 x 25 cm en promedio) debidamente conectados a todos los muros bajo la hipótesis de

diafragma rígido. Se consideró que el módulo de elasticidad del concreto es E_c=173,925 kg/cm^2 y su módulo de rigidez a cortante G_c=69,570 kg/cm^2. Las cargas muertas y vivas en las losas se supusieron uniformemente distribuidas. Las cargas por peso propio en muros y losas se incluyeron de manera directa en cada elemento a través de su peso volumétrico. Las cargas laterales se aplicaron en los centros de masa de cada nivel. Se utilizaron dos combinaciones de carga: 1) 100% de las cargas gravitacionales más el 100% de la carga lateral en la dirección X y, b) 100% de las cargas gravitacionales más el 100% de la carga lateral en la dirección Y. No se aplicaron factores de carga ni se incluyeron efectos P-Δ en los análisis, pues el propósito del estudio fue comparar a todos los métodos de análisis en condiciones lo más idénticas posibles y con base en las limitaciones que aplican al método simplificado (no incluye efectos de segundo orden, por ejemplo). En la Fig. 6 se presentan algunos isométricos extruidos del ETABS para los modelos α en estudio bajo el modelado conforme al método de la columna ancha equivalente antes descrito.



a) Modelo α3 b) Modelo α6

Figura 6 Modelos extruidos en ETABS correspondientes al método de la columna ancha equivalente

4.3 Método del elemento finito

Para los análisis con el método del elemento finito, se empleo también el programa ETABS (CSI 2013). Los muros de mampostería y las losas se modelaron con elementos tipo cascarón grueso (“thick shell”). Los muros en la base se consideraron empotrados en su plano principal de flexión y simplemente apoyados fuera del plano. Se utilizó una malla razonable para fines prácticos de diseño en despachos de cálculo, en que el tamaño promedio del elemento cascarón fue de 12.5 cm x 25 cm aproximadamente para modelar a los muros de planta baja y de 25 cm x 50 cm aproximadamente para los muros de los niveles superiores. La transición de la malla entre los muros de planta baja y del primer nivel se hizo a través de los elementos cascarón de la losa del primer nivel. En los

niveles superiores el mallado de la losa fue más simple, pues sólo se vigiló que se cumpliera con continuidad y que todos los nodos estuvieran debidamente conectados. Obviamente, los módulos de elasticidad y de cortante considerados para la mampostería y para el concreto son los mismos que se emplearon con el método de la columna ancha equivalente: E_m=21,600 kg/cm^2, G_m=9,000 kg/cm^2, E_c=173,925 kg/cm^2 y G_c=69,570 kg/cm^2. La discretización de cargas gravitaciones y laterales, combinaciones de cargas son iguales a las consideradas en el método de la columna ancha equivalente. También se despreciaron los efectos P-Δ. En la Fig. 7 se presenta un isométrico del ETABS para el modelo en elementos finitos del edificio α6 en estudio.

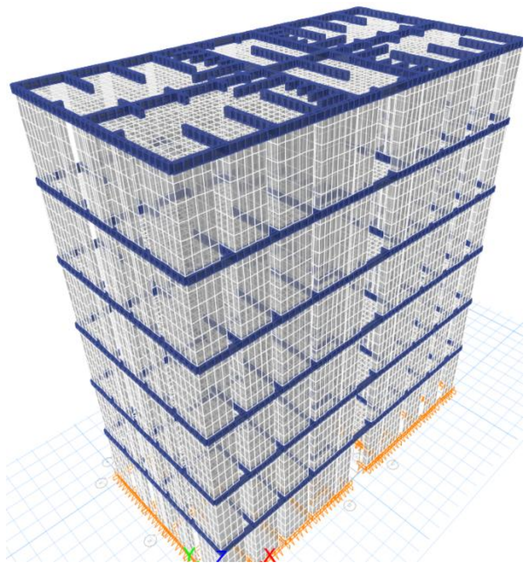


Figura 7 Isométrico del modelo en elementos finitos del edificio α6 en estudio

5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS

Dado que con el método simplificado se estiman únicamente las fuerzas cortantes actuantes en los muros ante carga lateral, y que se estiman cargas axiales de diseño conforme a una bajada de cargas gravitaciones, éstos son los elementos mecánicos obtenidos de los análisis realizados con las fuerzas gravitacionales y laterales identificadas en la Tabla 2 y que se comparan entre los distintos métodos, como se discute en las siguientes secciones.

5.1 Fuerzas cortantes

El nivel crítico para diseño por cortante de los muros es en planta baja, donde se presentan los cortantes de entrepiso máximos en estructuras que responden predominantemente conforme a su modo fundamental de vibración, que es el caso de los edificios con base en muros de mampostería de poca altura en estudio. Así, se determinaron las fuerzas cortantes actuantes en cada uno de los muros de los modelos ante los patrones de carga lateral ya descritos y definidos. Con la finalidad de facilitar la comparación de las fuerzas cortantes obtenidas para cada muro de planta baja (V_{muro}) para cada método de análisis en

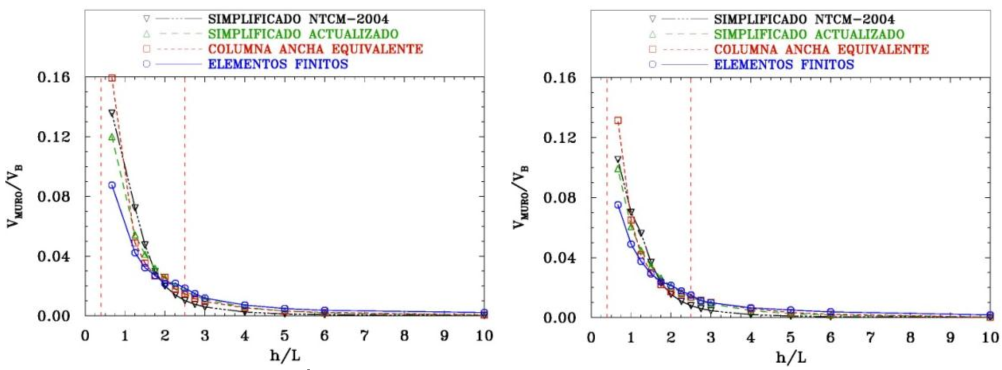
función de la relación de esbeltez global (*H/B*) de cada modelo, éstas se normalizaron con respecto a los cortantes basales de análisis (V_B) para cada modelo que se reportan en la Tabla 2 en el renglón identificado con la letra griega Σ. En las Figs. 8 a 11 se presentan, para los modelos α3 (*H/B*=1.13) a α6 (*H/B*=2.25) respectivamente, los cortantes de los muros tipo de planta baja así normalizados (V_{muro}/V_B), donde los muros tipo están identificados en función de su relación de esbeltez (*h/L*), tanto para la dirección X como la dirección Y. En las Figs. 8 a 11 se indica con líneas punteadas el intervalo de relaciones de esbeltez más comunes de los muros en estructuras con base en muros de mampostería confinada ($0.4 \leq h/L \leq 2.5$).

Se aprecia lo siguiente de las Figs. 8 a 11, tanto para las direcciones X (inciso a) como Y (inciso b):

a) Como era de esperarse, los muros razonablemente robustos o cuadrados (con relaciones de esbeltez *h/L*<1) son los que absorben proporcionalmente una mayor parte de la fuerza cortante actuante en cada entrepiso, mientras que los muros muy esbeltos (*h/L*>3) prácticamente no aportan mucho a la resistencia a fuerza cortante.

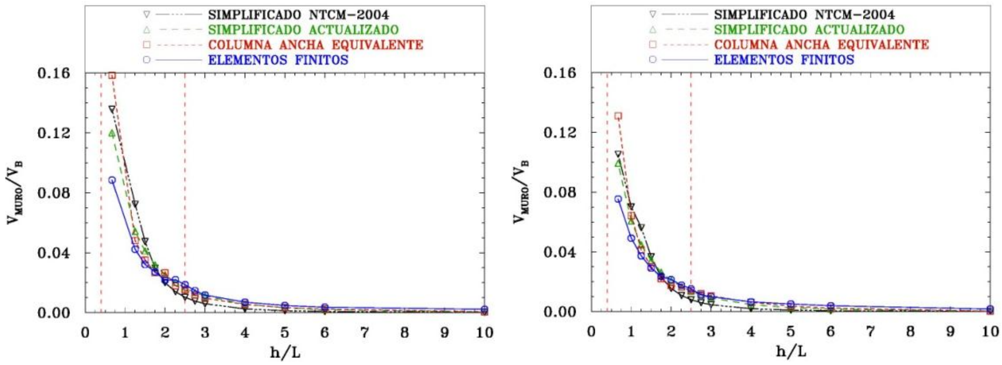
b) No se aprecian diferencias de importancia en las fuerzas cortantes normalizadas (V_{muro}/V_B) para cada muro conforme aumenta la relación de esbeltez global de la estructura, *H/B*. De hecho, los valores de los cortantes normalizados para cada muro obtenidos para cada modelo son muy similares, tanto para los modelos que cumplen la restricción del método simplificado para su esbeltez global: $H/B \leq 1.5$ (modelos α3 y α4, Figs. 8 y 9), como para aquéllos que, al sobrepasar esta relación límite, en teoría no deberían analizarse con el método simplificado (α3 y α4, Figs. 10 y 11).

c) Aparentemente, existe mayor dispersión de las fuerzas cortantes estimadas entre los distintos métodos de análisis cuando los muros son muy robustos ($h/L \leq 1$). Es particularmente notoria la diferencia obtenida entre todos los métodos en estudio y el método de elementos finitos para los muros más robustos considerados (*h/L*= 0.67). Se aprecian diferencias también cuando *h/L*>4.



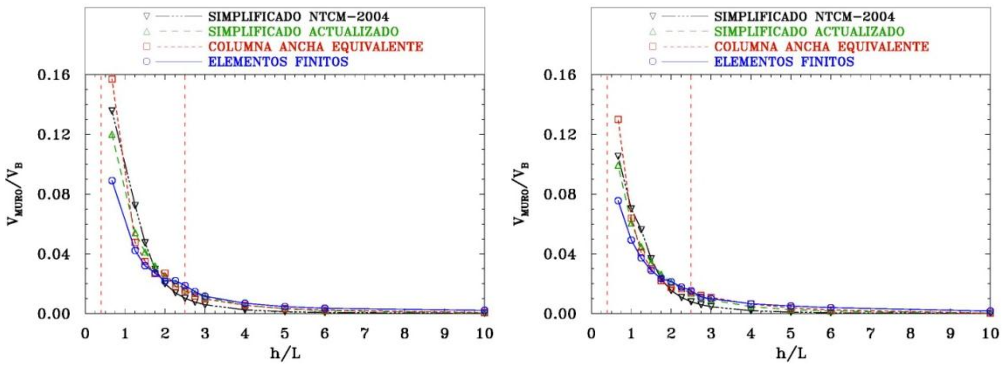
a) Dirección X b) Dirección Y

Figura 8 Fuerzas cortantes de cada muro tipo de planta baja (V_{muro}) del modelo α3 (*H/B*=1.13) normalizadas con respecto al cortante basal (V_B) actuante. Los muros se identifican en función de su relación de esbeltez (*h/L*)



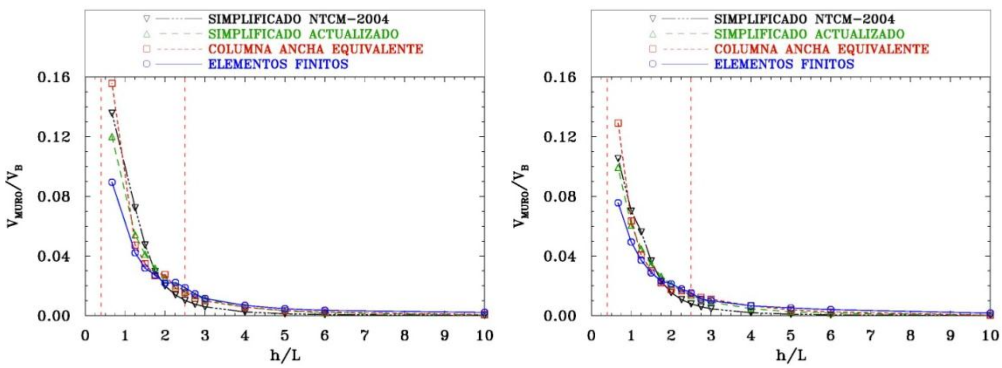
a) Dirección X b) Dirección Y

Figura 9 Fuerzas cortantes de cada muro tipo de planta baja (V_{muro}) del modelo α4 (H/B=1.5) normalizadas con respecto al cortante basal (V_B) actuante. Los muros se identifican en función de su relación de esbeltez (h/L)



a) Dirección X b) Dirección Y

Figura 10 Fuerzas cortantes de cada muro tipo de planta baja (V_{muro}) del modelo α5 (H/B=1.88) normalizadas con respecto al cortante basal (V_B) actuante. Los muros se identifican en función de su relación de esbeltez (h/L)

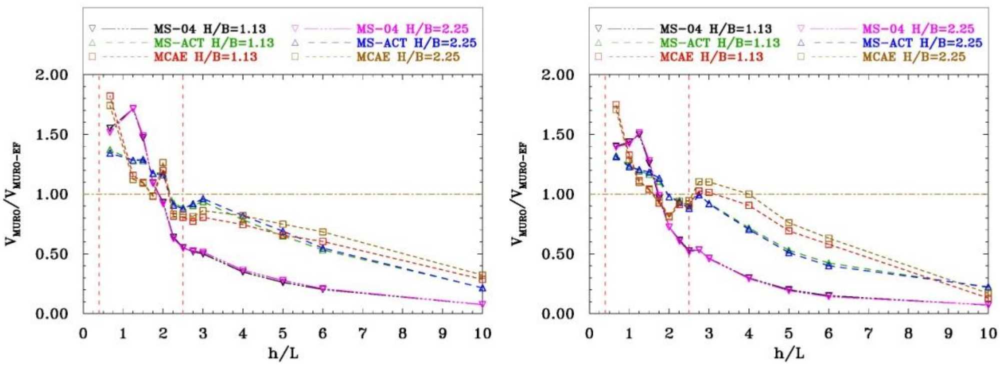


a) Dirección X b) Dirección Y

Figura 11 Fuerzas cortantes de cada muro tipo de planta baja (V_{muro}) del modelo α6 (H/B=2.25) normalizadas con respecto al cortante basal (V_B) actuante. Los muros se identifican en función de su relación de esbeltez (h/L)

Con la finalidad de comparar más fácilmente y directamente a los distintos métodos de análisis en estudio, particularmente a las dos variantes consideradas

para el método simplificado, las fuerzas cortantes obtenidas con cada método de análisis para cada muro (V_{muro}) se normalizaron con respecto a la fuerza cortante obtenida para ese muro con el método de elementos finitos ($V_{muro\text{-}ef}$), que se considera que es con el que se obtiene una mejor aproximación al comportamiento “real”. Las fuerzas cortantes de los muros así normalizadas ($V_{muro}/V_{muro\text{-}ef}$) se presentan en la Fig. 12, donde nuevamente los muros tipo están identificados en función de su relación de esbeltez (h/L) y se indica con líneas punteadas las relaciones de esbeltez de muros más comunes en estructuras con base en muros de mampostería confinada ($0.4 \leq h/L \leq 2.5$). Para facilitar la comparación, y dado que se observó que existía poca variación de las fuerzas normalizadas para cada muro en función de la relación de esbeltez global de cada estructura (H/B), en la Fig. 12 se presentan exclusivamente las curvas obtenidas para los modelos de menor y mayor esbeltez global, los modelos α3 (H/B=1.13) y α6 (H/B=2.25). En la Fig. 12 y las que siguen, se identifica a los resultados obtenidos como: a) MS-04 a los del método simplificado según las NTCM-04, b) MS-ACT a los del método simplificado con la propuesta actualizada del factor de área efectiva (ecuación 10) y, c) MCAE a los del método de la columna ancha equivalente.



a) Dirección X b) Dirección Y

Figura 12 Fuerzas cortantes de cada muro tipo de planta baja (V_{muro}) de los modelos α3 (H/B=1.13) y α6 (H/B=2.25) normalizadas con respecto a la fuerza cortante respectiva de cada muro en planta baja obtenida con el método del elemento finito ($V_{muro\text{-}ef}$). Los muros se identifican en función de su relación de esbeltez (h/L)

Con base en los resultados presentados en la Fig. 12 se hacen las siguientes observaciones generales:

a) La peor aproximación con respecto a los resultados obtenidos con el método de elementos finitos se obtienen para el método simplificado cuando se utiliza el factor de área efectiva de las NTCM-04 (MS-04) en todo el intervalo de relaciones de esbeltez (h/L) de los muros en estudio. Los cortantes se sobrestiman ($V_{muro}/V_{muro\text{-}ef}>1$) cuando $h/L<2$ y de manera notable cuando $h/L<1.33$. La subestimación de los cortantes es muy notable cuando $h/L>2.5$.

b) Se aprecia una mejora notable en las aproximaciones obtenidas con el método simplificado con respecto al método del elemento finito cuando se emplea el factor de área efectiva actualizado (MS-ACT) en todo el intervalo de relaciones de esbeltez de muros consideradas. Las

sobreestimaciones obtenidas cuando $h/L<2$ están en intervalos más razonables, menores al 40%. De igual manera, las subestimaciones dejan de estar en un margen tolerable (hasta 40%) a partir de $h/L \geq 6$. En síntesis, el método simplificado con el factor de área efectiva actualizado propuesto (ecuación 10) constituye una buena opción, si se toma en cuenta que en pocas ocasiones se diseñan estructuras de mampostería con muros con relaciones de esbeltez mayores a 3.0, y normalmente a estos muretes que tienen proporciones más bien de columnas, conocidos coloquialmente como "mochetas", normalmente se desprecian para fines de resistencia ante sismo en el diseño de estructuras de mampostería (aunque deben detallarse para que no fallen abruptamente).

c) Se aprecia que cuando se comparan los cortantes de los muros obtenidos con el método de la columna ancha equivalente (MCAE) con los del método del elemento finito, en general se obtienen aproximaciones sólo un poco mejores que la obtenida el método simplificado con factor de área efectiva actualizada (MS-ACT) en el intervalo de relaciones de esbeltez consideradas para los muros. De hecho, las aproximaciones obtenidas con el MCAE sólo son mejores que las obtenidas con el MS-ACT cuando $h/L \geq 4.0$ pues, de hecho, dentro del intervalo de mayor interés ($0.4 \leq h/L \leq 2.5$), se puede decir que, en promedio, las aproximaciones del MS-ACT son mejores que las obtenidas con el MCAE cuando se comparan con los resultados obtenidos con el método del elemento finito, para ambas direcciones.

Como se comentó anteriormente, en México el método de análisis más comúnmente empleado en el diseño de estructuras que no cumplen con las restricciones del método simplificado (e incluso con aquéllas que lo cumplen) es el método de la columna ancha equivalente. Así, desde un punto de vista de evaluar qué tanto se gana o pierde utilizando el método simplificado en lugar del método de la columna ancha equivalente, las fuerzas cortantes obtenidas con las dos variantes del método simplificado se normalizaron con respecto a las fuerzas cortante obtenidas con el método de la columna ancha equivalente ($V_{muro\text{-}cae}$) y los resultados se presentan en la Fig. 13.

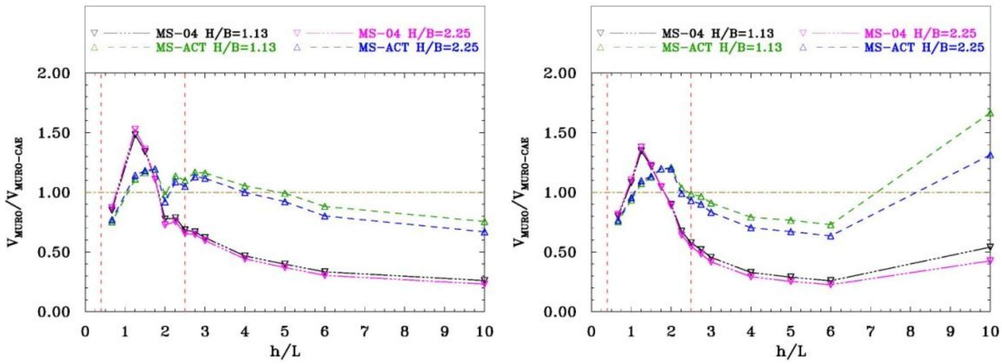
De la observación de los resultados mostrados en la Fig. 13 se confirma que:

a) las aproximaciones obtenidas con el método simplificado y el factor de área efectiva de las NTCM-04 (MS-04) es muy mala en todo el intervalo de relaciones de esbeltez de los muros (h/L) consideradas y,

b) las aproximaciones obtenidas con el método simplificado con el factor de área efectiva actualizado (MS-ACT) es muy buena en el intervalo $0.67 \leq h/L \leq 5.0$, pero el grado de aproximación disminuye notablemente cuando $h/L>5$. Estos resultados eran de esperarse, porque el factor de área efectiva actualizado (ecuación 10) se obtuvo a partir de: 1) análisis de estructuras donde los muros se modelaron como columnas anchas equivalentes y, 2) se derivó extendiendo de manera artificiosa el intervalo de relaciones de esbeltez h/L entre 0.2 y 5.0 (Fig. 5).

Sin embargo, los resultados aquí obtenidos indican la necesidad de extender los estudios paramétricos para cubrir un intervalo $0.05 \leq h/L \leq 10$ para tener

una propuesta del factor de área efectiva más robusto y que proteja de mejor manera el diseño de todos los muros, aunque en realidad, en la mayoría de los casos, existan muy pocos muretes en estructuras de mampostería confinada donde *h/L*>3.



a) Dirección X b) Dirección Y

Figura 13 Fuerzas cortantes de cada muro tipo de planta baja (V_{muro}) de los modelos α3 (*H/B*=1.13) y α6 (*H/B*=2.25) normalizadas con respecto a la fuerza cortante respectiva de cada muro en planta baja obtenida con el método de la columna ancha equivalente ($V_{muro\text{-}cae}$). Los muros se identifican en función de su relación de esbeltez (*h/L*)

Por lo tanto, se puede concluir que la propuesta actualizada del factor de área efectiva para comportamiento elástico dada por la ecuación 10 es muy razonable y constituye una opción muy superior a la de los factores de área efectiva propuestos en las NTCM-04, por lo que se debe preferir su uso con el método simplificado si se considera que el comportamiento del edificio será elástico, como sería el caso de emplearlo para el diseño de estructuras de mampostería con aislamiento sísmico (Tena-Colunga 2014, Tena 2016 y 2017).

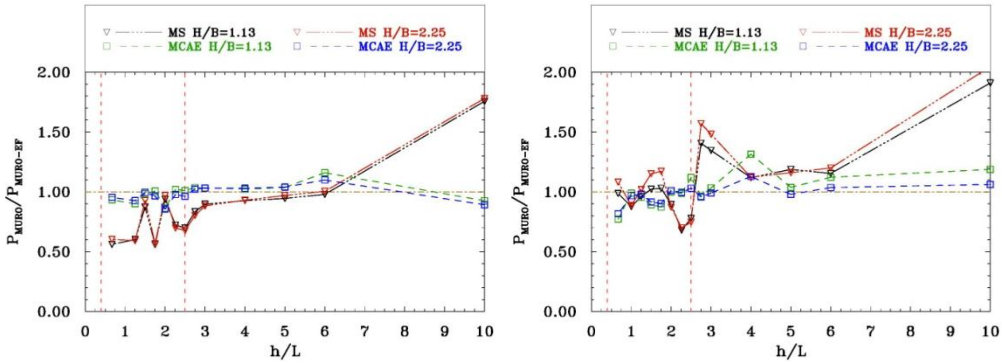
5.2 Fuerzas axiales

El nivel crítico para diseño por carga axial también corresponde a los muros de planta baja, donde se presentan los valores máximos tanto por carga gravitacional como por sismo.

En el caso de las cargas axiales, se consideró más interesante comparar las fuerzas de compresión estimadas de una bajada de cargas por cargas gravitacionales con el método simplificado con las obtenidas para las combinaciones de carga gravitacionales con laterales por sismo, para valorar qué tanto se desprecia o pierde con esta simplificación, dado que en el método simplificado no existe actualmente una propuesta de cómo deben incluirse las cargas axiales asociadas a las cargas laterales por sismo para fines de diseño y, por tanto, se desprecian en el diseño.

En la Fig. 14 se presentan los resultados cuándo las fuerzas axiales de compresión actuantes en cada muro de planta baja (P_{muro}) se normalizan con respecto a aquéllas estimadas por el método de elemento finito ($P_{muro\text{-}ef}$). Para este caso, no hay distinción para el método simplificado y sus resultados se identifican como “MS” solamente, pues no se emplea el factor de área efectiva para la

estimación de cargas axiales. Los resultados obtenidos con el método de la columna ancha equivalente se distinguen como “MCAE”.



a) Dirección X b) Dirección Y

Figura 14 Fuerzas axiales de compresión de cada muro tipo de planta baja (P_{muro}) de los modelos $\alpha3$ (H/B=1.13) y $\alpha6$ (H/B=2.25) normalizadas con respecto a la fuerza axial respectiva de cada muro en planta baja obtenida con el método del elemento finito ($P_{muro\text{-}ef}$). Los muros se identifican en función de su relación de esbeltez (h/L)

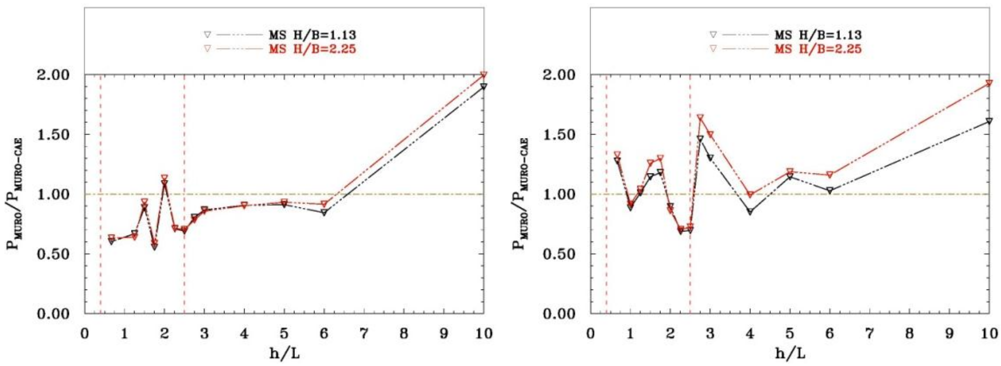
De los resultados expuestos en la Fig. 14, se pueden hacer las siguientes observaciones relevantes:

a) No existen diferencias significativas entre la estimación de las fuerzas axiales de compresión actuantes por combinación de cargas verticales y por sismo entre el método de la columna ancha equivalente y el método del elemento finito, para todo el intervalo de relaciones de esbeltez *h*/L de los muros en estudio, pues las diferencias máximas son del orden del 20%-30%, y en promedio son de menos de 10%. De hecho, se observa que la aproximación mejora a medida que la relación global de esbeltez (*H/B*) de la estructura en estudio aumenta.

b) La estimación de las cargas axiales con el método simplificado ignorando la combinación por carga lateral por sismo puede ser razonable, dado que las fuerzas de tensión por sismo que se suman no llegan a ser tan importantes de manera que los muros no desarrollen fuerzas netas de compresión; la máxima subestimación es del orden de 45%. Las mayores diferencias se observan para los muros más esbeltos (h/L=10), donde se aprecian sobrestimaciones del orden del 75%al 100%, a pesar de que su posición en planta no está muy alejada del centroide de la planta (Fig. 3, Tabla 1). Las variaciones de las cargas axiales observadas en los muros en intervalo $0.4 \leq h/L \leq 2.5$ tiene que ver con dos factores: 1) qué tan razonable fue la hipótesis del área tributaria de cada muro para la bajada de cargas conforme al método simplificado (hay que recordar que, por no contar con vigas que permitieran definir tableros, éstas áreas no son 100% representativas sin un análisis más refinado) y, 2) la posición del muro con respecto al centro de la planta, dado que mientras más alejado se encuentre del centro, mayor es la carga axial que toma por efecto de cargas laterales. En este caso, y como era de esperarse, las estimaciones disminuyen a medida que la relación global de esbeltez

(H/B) de la estructura aumenta, pero sólo es notable esta variación en los muros de la dirección Y (Fig. 14b), pues en la dirección X (Fig. 14a), la variación entre H/B=1.13 y H/B=2.25 es poco notable, prácticamente nula.

En la Fig. 15 se comparan las fuerzas axiales de compresión actuantes en cada muro de planta baja con el método simplificado (P_{muro}) cuando se normalizan con respecto a aquéllas estimadas con el método de la columna ancha equivalente ($P_{muro\text{-}cae}$), que es el método alterno de diseño de referencia. Dado que ya se habían observado pequeñas diferencias entre el método del elemento finito y el método de la columna ancha (Fig. 14), se aprecia prácticamente lo mismo. Si acaso, en estas gráficas es más notorio que las aproximaciones obtenidas con el método simplificado (MS) con respecto al método de la columna ancha equivalente disminuyen a medida que la relación global de esbeltez (H/B) de la estructura aumenta, tanto en la dirección X (Fig. 15a), como en la dirección Y (más notable Fig. 15b). No obstante, para fines prácticos estas diferencias son bastantes menores al 10% en un amplio intervalo de valores de relaciones de esbeltez de los muros, h/L y, por tanto, pueden tolerarse para fines prácticos de análisis y diseño.



a) Dirección X b) Dirección Y

Figura 15 Fuerzas axiales de compresión de cada muro tipo de planta baja (P_{muro}) de los modelos α3 (H/B=1.13) y α6 (H/B=2.25) normalizadas con respecto a la fuerza axial respectiva de cada muro en planta baja obtenida con el método de la columna anca equivalente ($P_{muro\text{-}cae}$). Los muros se identifican en función de su relación de esbeltez (h/L)

6 COMENTARIOS FINALES

Se presentó un estudio encaminado a revisar las limitaciones del método simplificado de análisis y diseño sísmico de los reglamentos modelos de México con respecto a la esbeltez global de la estructura. Para ello, se compararon las fuerzas cortantes y axiales de análisis obtenidos con el método simplificado con aquéllos obtenidos con métodos más rigurosos, como el método de la columna ancha equivalente y el método del elemento finito, para estructuras con base en muros de mampostería que cumplen con las demás restricciones del método.

A partir del análisis de los resultados obtenidos en este estudio, se puede concluir lo siguiente:

- Con el método simplificado se pueden obtener aproximaciones muy razonables de las fuerzas cortantes de análisis que absorben los muros con respecto a los métodos del elemento finito y de la columna ancha equivalente si se emplean factores de área efectiva racionales y actualizados, como el propuesto en la ecuación 10, para un amplio intervalo de relaciones de esbeltez de los muros, *h/L*. Nuevamente se demuestra que el factor de área efectiva de las NTCM-04, que se propuso originalmente en 1987 y sin estudios que los avalen, resulta ya obsoleto y debe actualizarse en futuras versiones de los reglamentos modelos de México.
- No existen variaciones importantes entre las fuerzas cortantes de análisis de los muros críticos de planta baja normalizadas con respecto a las obtenidas con los métodos de análisis más rigurosos en función de la relación de esbeltez global (*H/B*) de las estructuras en estudio el intervalo considerado ($1.13 \leq H/B \leq 2.25$). Así, se observó que existen pocas diferencias entre los resultados obtenidos para una relación $H/B=1.13$ con respecto a $H/B=2.25$.
- La estimación de las cargas axiales de los muros en planta baja con el método simplificado ignorando la combinación por carga lateral por sismo puede ser razonable, dado que las fuerzas de tensión por sismo que se suman no llegan a ser tan importantes de manera que los muros no desarrollen fuerzas netas de compresión. La máxima subestimación es del orden de 45% para muros de proporciones razonables. Las mayores diferencias se obtienen en muretes con relaciones de esbeltez $h/L=10$, que prácticamente son columnas de mampostería.
- Las aproximaciones de las cargas axiales obtenidas con el método simplificado con respecto a los métodos rigurosos disminuyen de manera poco apreciable a medida que la relación global de esbeltez (*H/B*) de la estructura aumenta en el intervalo estudiado ($1.13 \leq H/B \leq 2.25$). Las diferencias obtenidas son menores al 10% en un amplio intervalo de valores de relaciones de esbeltez de los muros, *h/L* y, por tanto pueden tolerarse para fines prácticos.

Así, se puede concluir que, en términos generales, este estudio avala con resultados, y no con sólo hipótesis, que una versión actualizada del método simplificado pudiera incluso emplearse con confianza para edificaciones de hasta 18 metros de altura y con relaciones de esbeltez global límite cercanas a 2.25 (el límite actual es 1.5). De hecho, a partir de los extensos estudios previos realizados por el primer autor y sus colaboradores, además de aportaciones de otros colegas internacionales, se considera que se puede trabajar en proponer una versión actualizada y extendida del método simplificado para su aplicación a estructuras de mayor altura, que permite algunas irregularidades de la huella de la planta, para distintos niveles de desempeño. Este equipo de investigación está trabajando en este sentido y se espera proponer esta nueva versión actualizada del método simplificado próximamente.

REFERENCIAS

1. Bazán, E. y Meli, R. (1998), *Diseño sísmico de edificios*, primera edición, editorial Limusa.
2. Brzev, S. (2017), Comunicación personal.
3. Cano, J. (2005), "Propuesta de modificación al método simplificado de análisis sísmico de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", *Tesis de Maestría*, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, marzo.
4. Cano, J. y Tena, A. (2005), "Diseño sísmico de estructuras de mampostería para distintos niveles de desempeño estructural con base en adecuaciones propuestas al método simplificado de análisis", *Memorias, XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, México, DF, CDROM, Artículo No. X-01, pp. 1-20, septiembre.
5. Chinchilla, K. L. (2012), "Evaluación de la flexibilidad de diafragma en sistemas de piso utilizados en edificios urbanos", *Tesis de Maestría*, Posgrado en Ingeniería Estructural, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, octubre.
6. Cortés, J. A. (2009), "Evaluación de la flexibilidad de diafragma para sistemas de piso utilizados en estructuras de mampostería", *Proyecto Terminal II*, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, agosto.
7. CSI (2013), "CSI Analysis reference manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge", Computers and Structures Inc., Estados Unidos, marzo.
8. López, A. (2007), "Estudio de las limitantes por torsión impuestas al método simplificado de análisis de estructuras de mampostería", *Tesis de Maestría*, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, marzo.
9. NTCM-87 (1987), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, noviembre.
10. NTCM-95 (1995), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, febrero.
11. NTCM-04 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, octubre.
12. NTCS-04 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Tomo II, No. 103-BIS, octubre, pp. 55-77.
13. MOC-2008 (2009), "Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo", Instituto de Investigaciones Eléctricas y Comisión Federal de Electricidad, México, noviembre.

14. MOC-2015 (2015), “Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo”, Instituto de Investigaciones Eléctricas y Comisión Federal de Electricidad, México, noviembre.
15. Pineda, P. G. (2015), “Evaluación de las limitaciones por esbeltez global y local del método simplificado de análisis y diseño sísmico de estructuras de mampostería”, *Proyecto Terminal I*, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, abril.
16. Porst, C. F. (2015), “Confined masonry for seismically resilient low-cost housing in India: a design and analysis method”, *MSc. Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, junio.
17. Porst, C., Brzev, S. y Ochsendorf, J. (2017), “Confined masonry for resilient low-cost housing in India: a design and analysis method”, *Memorias, 16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, Artículo No. 3876, CD-ROM, enero.
18. Schwaighofer, J y Microys, H. F. (1969), “Analysis of shear walls using standard computer programs,” *ACI Journal*, Title No 66-89, pp. 1005-1007.
19. Tena, A., Pérez, M. A. y Cano, J. (2002), “Propuesta de modificación a la estimación de las fuerzas cortantes del método simplificado de análisis”, *Memorias, XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Puebla, CDROM, Artículo No. 156, pp. 1057-1068, noviembre.
20. Tena, A. y López, A. (2006), “Revisión de la excentricidad límite del método simplificado de análisis de estructuras de mampostería del RCDF vigente”, *Memorias, XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Puerto Vallarta, Jalisco, CDROM, pp. 1-22, noviembre.
21. Tena, A. (2007), *Análisis de estructuras con métodos matriciales*, primera edición, Limusa, ISBN-13:978-968-18-6980-9, septiembre.
22. Tena, A y Cortés, J. A. (2009), “Valoración de la rigidez del diafragma para el empleo del método simplificado de diseño sísmico de los reglamentos de México en estructuras de mampostería”, *Boletín Técnico IMME*, Vol. 47, No. 3, pp. 25-40.
23. Tena, A., Cano, J., López, A. y Pérez, M. A. (2010), “Revisión y actualización del método simplificado de análisis de estructuras de mampostería de los reglamentos de diseño sísmico de México”, *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 82, pp. 1-33.
24. Tena, A., Rivera, G. y Vergara, J. (2011), “Estimación de la rigidez lateral elástica de muros con aberturas”, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 11. No. 2, pp. 135-161.
25. Tena, A., Chinchilla, K. L. y Juárez, G. (2013), “Evaluación de la flexibilidad elástica de sistemas de piso utilizados en edificios urbanos”, *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 89, pp. 135-166.
26. Tena, A. (2016), “Manual de diseño de obras civiles. Sección C: Estructuras, Tema 3: Monitoreo y Control de Respuestas Estructurales, Capítulo 2: Diseño de estructuras con aislamiento de base”, Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

27. Tena, A. (2017), "Diseño sísmico simplificado de estructuras con muros de mampostería aisladas sísmicamente", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-33.
28. Tena-Colunga, A. y Pérez-Osornio, M. A. (2005), "Assessment of shear deformations on the seismic response of asymmetric shear wall buildings", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 11, pp. 1774-1779, noviembre.
29. Tena-Colunga, A. y Cano-Licona, J. (2010), "Simplified method for the seismic analysis of masonry shear-wall buildings", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 136, No. 5, pp. 511-520, doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000142.
30. Tena-Colunga, A. y López-Blancas, A. (2011), "Allowable torsional eccentricity for the simplified method for the seismic analysis of confined masonry shear-wall buildings", *The Open Civil Engineering Journal*, Vol. 5, pp. 132-142.
31. Tena-Colunga, A. (2014), "Simplified method for the seismic design of low-rise, shear wall base-isolated buildings", *The Open Construction and Building Technology Journal*, Vol. 8, pp. 22-33.
32. Tena-Colunga, A., Chinchilla-Portillo, K. L. y Juárez-Luna, G. (2015), "Assessment of the diaphragm condition for floor systems used in urban buildings", *Engineering Structures*, Vol. 93, pp. 70-84, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.025.